



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖMOOTTORIN KÄYTTÖ RASKAAN KALUSTON VOIMANLÄHTENÄ

Juho Berg

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Lokakuu 2020

TIIVISTELMÄ

Sähkömoottorin käyttö raskaan kaluston voimanlähteenä

Juho Berg

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2020, 29s

Työn ohjaaja yliopistolla: Miro-Tommi Tuutijärvi

Sähkömoottoreiden käyttö ajoneuvojen voimanlähteenä yleistyy jatkuvasti. Tämän kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on perehtyä erilaisiin raskaassa kalustossa käytettäviin sähkö- ja hybridivoimansiirron osiin. Työssä käydään läpi sähkömoottori-, akku- ja voimansiirtotyyppejä.

Teknisiin komponentteihin perehtymisen lisäksi työssä käydään läpi joidenkin valmistajien sähkömoottoria hyödyntäviä ratkaisuja. Työn pääpaino on henkilö- ja tavaraliikenteessä, mutta myös maa- ja metsätalous- sekä kaivoskoneista esitellään sähkömoottoria hyödyntävät ratkaisut.

Asiasanat: Sähkömoottori, Sähköajoneuvo, Hybridiajoneuvo, Hyötyajoneuvo

ABSTRACT

Electric commercial vehicles

Juho Berg

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2020, 29p.

Supervisor at the university: Miro-Tommi Tuutijärvi

Using electric motors as power source in commercial vehicles is becoming more and more common. The purpose of this bachelor's thesis is to familiarize yourself with the various components of commercial vehicle's electric and hybrid power transmissions. The work covers the types of electric motors, batteries and transmissions.

In addition to getting familiar with the technical components, the work goes through some manufacturer's solutions that utilize an electric motor. The focus of the work is on passenger and goods transport. In addition to transportation, solutions utilizing electric motors are presented for agricultural, forestry and mining machinery.

Keywords: Electric motor, Electric vehicle, Hybrid vehicle, Commercial vehicle

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	5
2 SÄHKÖMOOTTORI.....	7
2.1 AC-moottori	8
2.1.1 Induktiomoottori	9
2.1.2 Kestomagneettimoottori	10
2.2 DC-moottori	11
2.3 Sähkömoottorin valinta	13
3 VOIMANSIIRTO	14
3.1 Täyssähköajoneuvo	14
3.1.1 Akselikohtainen moottori	15
3.1.2 Pyöräkohtainen moottori	15
3.2 Hybridiajoneuvo.....	15
3.2.1 Sarjahybridi.....	16
3.2.2 Rinnakkaishybridi.....	17
4 AKUT JA NIIDEN LATAAMINEN.....	19
4.1 Lyijyakku	22
4.2 Nikkelimetallihybridi-akku	22
4.3 Litium-ioniakku.....	23
4.4 Superkondensaattori	23
4.5 Erilaisia lataustapoja	23
5 SÄHKÖMOOTTORIN KÄYTTÖ ERI KOHTEISSA.....	25
5.1 Henkilö- ja tavaraliikenne	25
5.2 Maansiirto ja kaivosteollisuus.....	26
5.3 Maa- ja metsätalous.....	26
6 YHTEENVETO	27
LÄHDELUETTELO	28

MERKINNÄT JA LYHENTEET

AC	Vaihtovirta (alternating current)
DC	Tasavirta (direct current)
IPM	Sisäpuolinen kestopagneetti (interior-permanent-magnet)
Li-ion	Litium-ioni
NiMH	Nikeli-metallihybridi
PbA	Lyijyakku
PM	Kestopagneetti (permanent-magnet)
SCIM	Häkkikäämitty induktiomoottori (squirrel-cage induction motor)
SPM	Ulkopuolinen kestopagneetti (surface-permanent-magnet)
WF	Kenttäkäämitty (wound-field)

1 JOHDANTO

Sähkömoottoreiden käyttö liikennevälineissä polttomoottoreiden sijaan kasvaa jatkuvasti. Erityisesti henkilöautojen valmistajat tuottavat nykyään markkinoille runsaasti sekä hybridi- että täyssähköautoja. Henkilöautoissa käytettävä tekniikka on tietyin rajoituksin siirrettävissä raskaan kaluston tarpeisiin. Tässä kandidaatintyössä tutustutaan raskaissa ajoneuvoissa käytettäviin sähkömoottoreihin, voimansiirtoihin ja akkuihin. Lisäksi työssä tarkastellaan eri valmistajien, eri käyttökohteisiin kehittämiä ratkaisuja. Työssä pääpaino on tieliikenteessä käytettävissä ajoneuvoissa, mutta esimerkkitapauksissa sivutaan myös muita käyttökohteita, kuten maansiirto-, maatalous- ja kaivosajoneuvoja.

Aiemmin sähköautojen mallivalikoima oli suppeampi ja saatavuus huonompi kuin nykyään, mikä osaltaan selittää niiden määrän kasvua liikenteessä. Teknologiateollisuuden tilastojen mukaan täyssähköisten henkilöautojen määrä on noussut vuodesta 2015 vuoteen 2018 mennessä 614 kappaleesta 2404 kappaleeseen. Samassa ajassa ladattavien hybridien määrä on kasvanut 966 kappaleesta 13095 kappaleeseen. Ladattavien hybridien määrän kasvu on siis ollut suorastaan räjähdysmäistä. (Teknologiateollisuus 2019)

Yhdysvaltain kongressi määräsi vuonna 1976 Energian tutkimus ja kehitys viraston ERDA:n (englanniksi Energy Research and Development Administratio), tutkimaan vaihtoehtoja bensiinikäyttöisille ajoneuvoille. Projektin syynä oli kaupunkien huonontunut ilmanlaatu, joka johtui fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Viiden vuoden projektin hinnaksi määriteltiin 160 miljoonaa dollaria. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 5)

Sähkömoottorin käyttö ajoneuvoissa ei ole mikään uusi keksintö, sillä jo 1900-luvun alussa useat valmistajat valmistivat sähkökäyttöisiä ajoneuvoja. Näillä ajoneuvoilla oli monia nykyisistäkin hybridiajoneuvoista tuttuja piirteitä. Erään nykyaikaisen hybridiauton esi-isän kehittäjä jo vuonna 1905 yhdysvaltalainen insinööri H. Piper, jonka suunnittelemassa hybridiautossa sähkömoottori oli avustamassa bensiinimoottoria kiihdytyksen aikana (Hu, Smaling et al. 2012, s. 4).

Taulukossa 1 on vertailtu eri käyttövoimia hyötysuhteen ja hiilidioksidipäästöjen mukaan. Voimansiirron hyötysuhteella tarkoitetaan ajoneuvon hyötysuhdetta ja well-to-wheel-hyötysuhteella polttoaineen tuotannon ja ajoneuvon voimansiirron yhteistä hyötysuhdetta. Taulukossa hybridin hyötysuhteet vaihtelevat muutaman prosenttiyksikön välillä, koska hybridityyppejä on useita erilaisia, eikä taulukossa ole eritelty mikä hybridi on valittu tarkasteltavaksi. Sähköllä on selkeästi paras voimansiirron hyötysuhde, mutta tarkasteltaessa well-to-wheel-hyötysuhdetta havaitaan erojen tasoittuvan huomattavasti. Dieselillä on molemmissa tilanteissa huonoin hyötysuhde.

Taulukko 1. Käyttövoimien vertailu (mukaiillen Hayes, Goodarzi 2018, s. 34, 35)

Käyttövoima	Voimansiirron hyötysuhde (%)	Well-to-wheel- hyötysuhde (%)	CO₂ -päästöt (gCO₂/km)
Diesel	20	17	115
Sähkö	80	27	73
Hybridi	25–28	21–24	84–103

2 SÄHKÖMOOTTORI

Sähkömoottorit voidaan jakaa vaihto- ja tasavirtamoottoreihin, sähkövirran kulkusuunnan mukaan. Vaihtovirtamoottoreita kutsutaan yleisesti AC-moottoreiksi (alternative current motor). AC-moottoreissa sähkövirran kulkusuunta vaihtelee. Tasavirtamoottoreissa sähkövirran kulkusuunta pysyy nimensä mukaisesti koko ajan samana, näistä moottoreista käytetään nimitystä DC-moottorit (direct current motor). Molemmat moottorityypit sisältävät samat peruskomponentit; käämi, staattori ja roottori. Staattori on moottorin paikallaan pysyvä osa, ja roottori puolestaan moottorin pyörivä osa. Ajoneuvokäytössä staattori on yleensä moottorin ulompana ja roottori sisempänä osana. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 161, Denton 2016, s. 91)

Erilaisia sähkömoottoreita ja niiden kaltaisia laitteita kehiteltiin jo 1820-luvulta alkaen. Varhaiset sähkömoottorit toimivat tasavirralla. Ensimmäisen patentin sähkömoottorille sai yhdysvaltalainen Thomas Davenport vuonna 1837 (Wicks 1999). Kului kuitenkin kymmeniä vuosia ennen kuin sähkömoottoreiden käytännölliseen hyötyyn alettiin uskoa. (Lindell 1994, s. 309:310)

Nikola Tesla vaikutti suuresti AC-tekniikan kehittymiseen, johon sähköverkostot nykyisin perustuvat. Hän työskenteli DC-järjestelmän patentoineen Thomas Edisonin alaisuudessa, mutta päätti kehittää kilpailevan järjestelmän. Vaihtovirtaa pidettiin alkuun vaarallisena ja varsinkin Edison pyrki kaikin mahdollisin keinoin kertomaan vaihtovirran vaarallisuudesta ja markkinoimaan omaa järjestelmäänsä. (Lindell 1994, s. 314:316)

AC-tekniikan kehittämisen lomassa Tesla kehitteli induktiomoottorin, jolle hän sai patentin vuonna 1888. Jo ennen tätä oli kehitelty vastaavia ratkaisuja, mutta Teslan merkitystä AC-moottoreiden ja koko nykyaikaisen sähkötekniikan saralla ei voida vähätellä. (Lindell 1994, s. 319)

Valinta moottorityyppien välillä tehdään käyttökohteen mukaan. DC-moottorin etuna ajoneuvokäytössä on yksinkertaisempi rakenne, sillä se ei vaadi invertteriä akun ja moottorin väliin (Denton 2016, s. 91). Hiiliharjallisella DC-moottorilla on kuitenkin rajallinen käyttöikä ja se vaatii huoltoa. AC-moottori puolestaan on käytännössä huoltovapaa, koska siinä ei ole muita kuluvia osia kuin akselin laakeroinnit, jotka on usein

suunniteltu kestämaan koko moottorin käyttöikä. Sillä on lisäksi parempi tehotehokkuus kuin DC-moottorilla, jonka lisäksi se on myös edullisempi. Ajoneuvon voimanlähteenä AC-moottorin käyttöä puoltaa myös mahdollisuus sen käyttämiseen generaattorina, jolloin hidastettaessa energia saadaan otettua talteen ajomoottorilla (Hu, Smaling et al. 2012, s. 164:165). Vaikka DC-moottori onkin erittäin helppokäyttöinen, AC-moottori on huomattavasti käytetympi liikkuvan kaluston voimanlähteenä parempien ominaisuuksiensa vuoksi. DC-moottoreiden käyttö rajoittuu lähinnä vähäistä voimaa vaativiin ratkaisuihin. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 161)

Sähkö- ja hybridi ajoneuvojen lisäksi sähkömoottoreita käytetään myös perinteisissä polttomoottoriajoneuvoissa. Polttomoottorin käynnistämiseen käytettävät starttimoottorit ovat harjallisia DC-moottoreita, kun taas ajoneuvon sähkölaitteiden käyttöön ja akun lataamiseen käytettävä laturi on eräs sovellutus AC-moottorista. Harjallisia DC-moottoreita käytetään myös lukuisissa ajoneuvon lisälaitteissa, kuten lasinpyyhkimen moottoreissa, lämmityslaitteen puhaltimissa ja sähköikkunoiden moottoreina. Harjattomia DC-moottoreita puolestaan käytetään suurta luotettavuutta ja pitkää käyttöikää vaativissa kohteissa, kuten polttoainepumpuissa ja sähköisissä ohjaustehostimissa. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 161:163)

2.1 AC-moottori

Nykyisin ajoneuvojen voimanlähteenä yleisimmin käytetyt AC-moottorit voidaan jakaa tahti- ja epätahtimoottoreihin, joilla molemmilla on omia alatyyppejä. Epätahtimoottorissa roottori pyörii hitaammin kuin staattorin pyörivä magneettikenttä. Tahtimoottorissa magneettikenttä ja roottori puolestaan pyörivät samalla nopeudella. Tahti- ja epätahtimoottorin toiminnasta on esimerkit induktio- ja keстомagneettimoottoreiden esittelyissä alaluvuissa 2.1.1 ja 2.1.2. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 165)

Ajoneuvokäytössä yleisimpiä moottoreita ovat epätahtimoottoreista induktio- ja tahtimoottoreista keстомagneettimoottorit. Aiemmin induktio- ja tahtimoottorit olivat erittäin suosittuja johtuen osittain niiden pitkästä historiasta teollisuuskäytössä. Induktiomoottorin käyttö on kuitenkin nykyään vähentynyt keстомagneettimoottoreiden käytön yleistytessä. Kestomagneettimoottorin hyötysuhde on noin 90 prosentin luokkaa,

kun taas induktiomoottori yltää vain noin 80 prosenttiin. Lisäksi kestopagneettimoottoria voidaan käyttää samaan aikaan moottorin lisäksi myös generaattorina. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 164:165)

AC-moottorin toiminta perustuu staattorin muodostamaan pyörivään magneettikenttään, jota roottori seuraa. Yleisimmin käytetään kolmivaiheista vaihtovirtaa, jolloin yksinkertaisimmillaan moottorissa olevat kolme 120 asteen välein olevaa kontaktoria saavat jokainen vuorollaan positiivisen arvon. Kolmivaiheisuuden vuoksi jokaiselle käämille syntyy positiivinen varaus saman taajuuden mukaan. Tämä saa aikaan pyörivän magneettikentän. Kun staattoriin kytketään vaihtovirta, siinä olevat käämit saavat aikaan pyörivän magneettikentän, jonka nopeus saadaan yhtälöstä (1):

$$n = 60 \frac{f}{p}, \quad (1)$$

missä n on magneettikentän pyörimisnopeus [rpm],

f on syötettävän vaihtovirran taajuus [1/s] ja

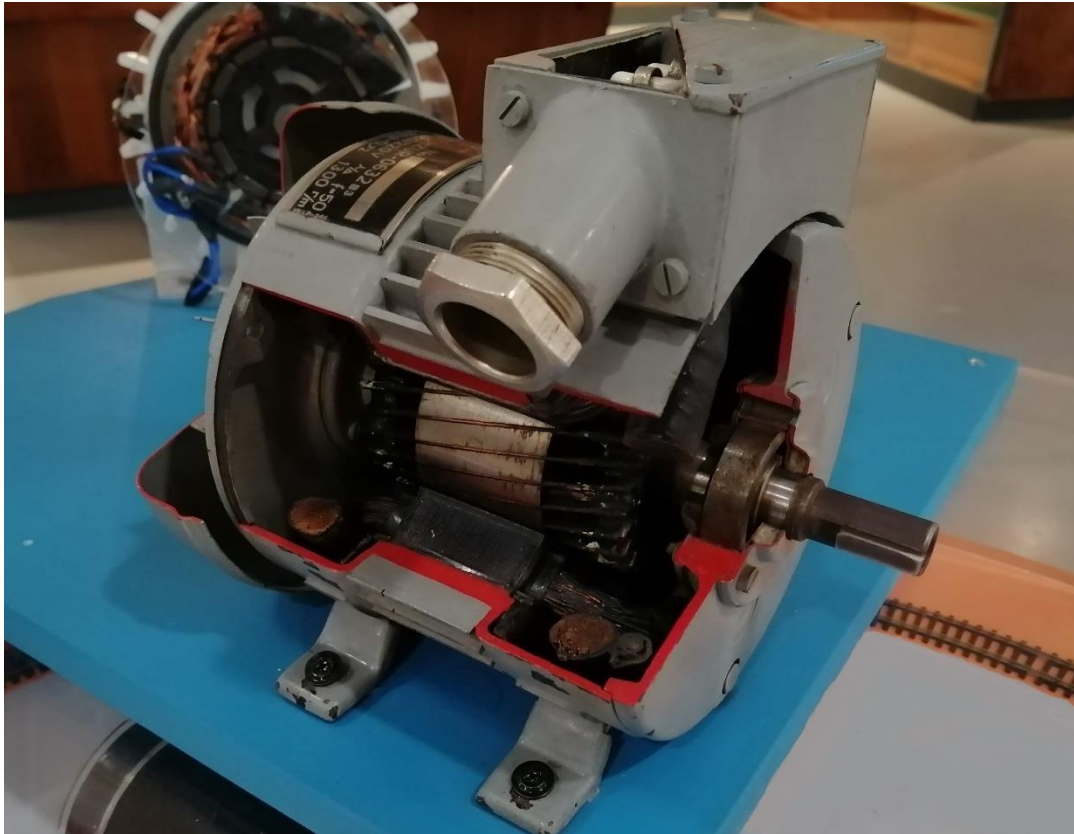
p on napaparien lukumäärä.

Pyörivä magneettikenttä aiheuttaa myös staattorin pyörimisen. Staattorin pyörimistavassa on eroja eri moottorityyppien välillä. (Denton 2016, s. 91:92)

2.1.1 Induktio-moottori

Eräs sovellutus induktio-moottorista on kuvassa 1 oleva ns. häkkikäämitetty moottori SCIM, jossa roottorin ympärillä on ikään kuin häkki. Pyörivän magneettikentän vuoksi roottoriin indusoituu jännitteitä Faradayn lain mukaisesti. Nämä jännitteet aikaansaavat magneettikentän, joka pyrkii seuraamaan staattorin pyörivää magneettikenttää. Koska induktio-moottori on epätahtimoottori, staattorin pyörimisnopeus ei ole yhtä suuri kuin pyörivän magneettikentän (Denton 2016, s. 92). (Hayes, Goodarzi 2018, s. 165:166)

Pyörivä magneettikenttä aiheuttaa myös staattorille magneettikentän, jolloin kenttien välinen magneettisuus aikaansaa roottorin pyörimisen. Roottori ei pyöri yhtä nopeasti kuin staattorin magneettikenttä. Pyörimisnopeuksien erotusta kutsutaan jättämäksi, joka on parhaan hyötysuhteen alueella noin 5 prosentin suuruinen. (Denton 2016, s. 91:92)



Kuva 1. HZUR induktiomoottori esillä Tekniikan museossa

2.1.2 Kestomagneettimoottori

Kestomagneettimoottorissa PM käytetään nimensä mukaisesti kestopagneetteja, jotka ovat vuorovaikutuksessa pyörivän magneettikentän kanssa. Syntyvä magneettikenttä saa aikaan roottorin pyörimisen, kun kestopagneetit lähtevät seuraamaan pyörivää magneettikenttää. PM-moottori on tahtimoottori, joten roottori pyörii samalla nopeudella kuin magneettikenttä. Kestomagneetit voivat olla joko roottorin sisäpuolella IPM tai vaihtoehtoisesti ulkopinnalla SPM. Roottorin ulkopuolisilla kestopagneeteilla varustettua moottoria käytetään lähinnä pienillä pyörimisnopeuksilla, koska se ei ole soveltuva kovien pyörimisnopeuksien sovellutuksiin. Ajoneuvokäytössä käytetäänkin

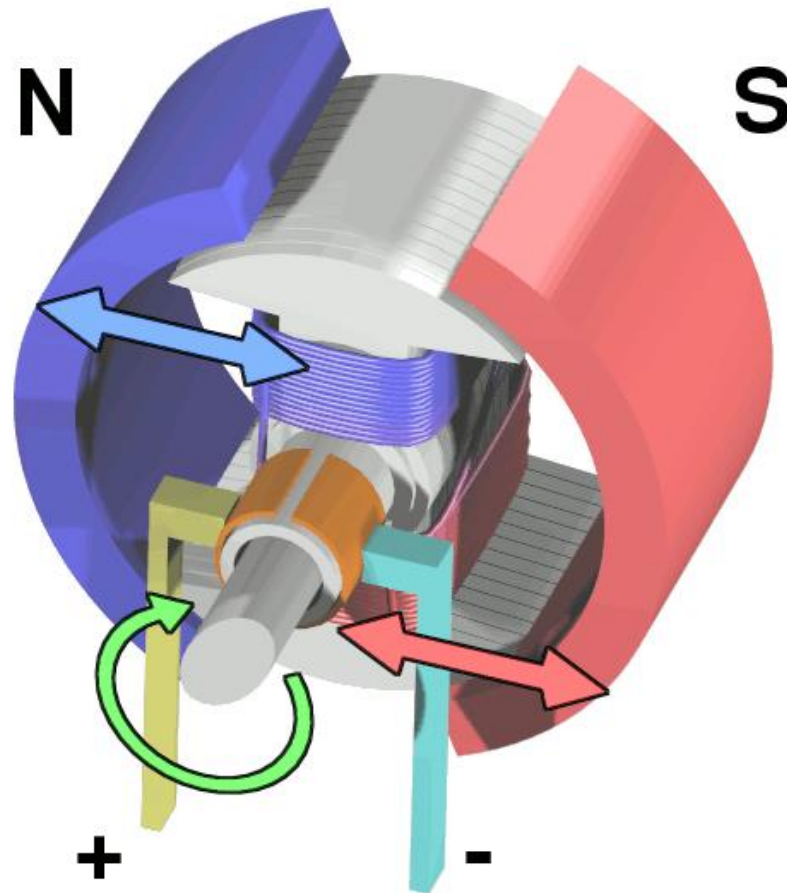
yleensä roottorin sisäpuolisilla kestopagneeteilla varustettuja moottoreita. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 166)

2.2 DC-moottori

DC-moottorit voidaan jakaa harjallisiin ja harjattomiin moottoreihin sekä kestopagneetti PM ja kenttäkäämittyihin WF moottoreihin. Koska DC-moottorissa käytetään tasavirtaa, täytyy roottoria pyörittävän magneettikentän napaisuus saada vaihdettua pyörimisliikkeen aikaansaamiseksi. Harjallisissa DC-moottoreissa tämä on hoidettu harjoilla ja kommutaattorilla, joka vaihtaa roottorin ankkurikäämien napaisuuden. Harjattomissa DC-moottoreissa napaisuus vaihdetaan sähköohjatusti. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 162:163)

Harjallisten DC-moottoreiden etuna on yksinkertainen ja edullinen rakenne, mutta haittapuolena on kulumien harjojen aiheuttama huollon tarve. Kulumien harjojen lisäksi myös hiiliharjoista irtoava hiilipöly aiheuttaa herkästi ongelmia moottorin käytössä. Pöly voi esimerkiksi tukkia moottorin, jolloin pahimmillaan moottori voi hajota kokonaan. (Motiva 2019)

Kuvassa 2 on esitetty yksinkertaistetusti harjallisen DC-moottorin rakenne. Syötettäessä moottoriin tasavirtaa virta kytkeytyy roottorin käämeihin. Roottorin käämit hylkivät staattorin magneetteja. Kuvan moottorissa punainen käämi hylkii punaista magneettia ja sininen käämi sinistä magneettia. Roottorin pyöriessä kommutaattori vaihtaa roottorin käämien napaisuuden, jolloin punainen käämi hylkii sinistä magneettia ja sininen käämi punaista magneettia. ja edelleen pyöriessä kommutaattori vaihtaa taas käämien napaisuutta. Napaisuuden vaihto tapahtuu aina puolikkaan kierroksen välein.



Kuva 2. Rakennekuva DC-moottorista (Wikipedia 2006)

Kestomagnetoitu sähköohjattu DC-moottori on melko samankaltainen kestopagnetoidun AC-moottorin kanssa. Siinäkin roottori on kestopagnetoitu, ja virta syötetään staattorin kenttäämitykseen. Kenttäämityksen napaisuuksien vaihto hoidetaan elektronisella kommutaattorilla. Kommutaattori tunnistaa tarkasti roottorin asennon, jolloin se osaa syöttää tarvittavaa virtaa. Tämä moottorityyppi ei vaadi läheskään yhtä paljon huoltoa kuin harjallinen DC-moottori. Harjattoman DC-moottorin haittapuolena on kuitenkin monimutkainen rakenne. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 163, Motiva 2019)

2.3 Sähkömoottorin valinta

Eri sähkömoottorityypit soveltuvat eri käyttötarkoituksiin. Eri sähkömoottorityyppien soveltuvuutta ajoneuvojen voimansiirtoon on vertailtu taulukossa 1.

Taulukko 1. Sähkömoottorityyppien vertailu (mukaillen Hayes, Goodarzi 2018, s. 168)

	AC-moottorit			DC-moottorit	
	SCIM	SPM	IPM	PM	WF
Koko	3	3	3	1	1
Hinta	3	2	3	1	1
Hyötysuhde	2	3	3	1	1
Jäähdytys	1	3	3	1	1
Huollettavuus	3	3	3	1	1
Luotettavuus	3	1	2	1	2
Ajoneuvokäyttö	3	1	3	1	1

Taulukossa on esitelty erilaisia kriteereitä, joista kullekin sähkömoottorityypille on annettu yhdestä kolmeen pistettä. Mitä enemmän sähkömoottorityyppi saa pisteitä, sitä paremmin se soveltuu ajoneuvojen voimansiirtoon. Taulukosta havaitaan AC-moottoreiden olevan huomattavasti soveltuvampia ajoneuvojen voimansiirron komponenteiksi. Varsinkin IPM-moottori on erittäin hyvin ajoneuvokäyttöön soveltuva. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 168)

3 VOIMANSIIRTO

Sähkömoottoria voidaan käyttää raskaassa kalustossa joko ainoana voimanlähteenä tai vaihtoehtoisesti hybridivoimansiirron osana. Käytettäessä ainoastaan sähkömoottoria ongelmaksi muodostuu usein rajallinen toimintasäde, mikä on ongelmallista varsinkin maantiekuljetuksissa. Suurin tekijä toimintasäteen rajallisuuteen on akuston riittämättömyys. Toimintasädettä on mahdollista kasvattaa lisäämällä akuston kapasiteettia, mutta tällöin ajoneuvon omamassa kasvaa ja hyötykuorma pienenee.

Hybridiajoneuvo pyrkii yhdistämään sekä sähkö- että polttomoottorin parhaat puolet. Hybridiajoneuvossa sähkömoottoria käytetään avustamaan polttomoottoria ja sitä kautta pienentämään kulutusta. Sähkömoottori tuottaa hyvän vääntömomentin myös huomattavasti matalammilla kierroksilla kuin polttomoottori. Tästä syystä sähkömoottorilla saadaan kasvatettua liikkeelle lähtöön käytettävissä olevaa vääntömomenttia. Tästä on hyötyä varsinkin raskaille ajoneuvoyhdistelmille. (Denton 2016, s. 58:59)

Henkilöautoissa ja busseissa hitaissa nopeuksissa voidaan käyttää pelkästään sähkömoottoria, jolloin kulutus ja päästöt pysyvät alhaisina. Hybridiajoneuvon etuna tavalliseen polttomoottoriajoneuvoon on myös jarrutusenergian talteen oton mahdollisuus, jolloin muutoin hukkaan menevä energia voidaan varastoida akkuun ja käyttää hyödyksi sopivassa tilanteessa. (Denton 2016, s. 58:59)

3.1 Täyssähköajoneuvo

Täyssähköajoneuvo, EV (electric vehicle), koostuu akusta, moottorin ohjausjärjestelmästä, moottorista ja voimansiirrosta. Lisäksi ajoneuvo vaatii latausjärjestelmän, johon kuuluu sekä ulkoinen lataus että ajon aikana varastoitava energia. Moottorin ohjausjärjestelmä pitää sisällään invertterin, jolla akusta saatava sähkövirta saadaan muunnettua haluttuun muotoon. Käytettäessä AC-moottoria on akuston sähkövirta muutettava vaihtovirraksi. Ohjausjärjestelmä myös säätelee vaihtovirran taajuutta moottorin pyörimisnopeuden muuttamiseksi. (Husain 2011, s. 3)

3.1.1 Akselikohtainen moottori

EV-ajoneuvossa sähkömoottori on perinteisesti sijoitettu voimansiirtolinjaan ennen tasauspyörästä. Tässä ratkaisussa yhdeltä sähkömoottorilta välitetään voima molemmille saman akselin vetäville pyörille. Moottori voidaan myös integroida akselin sisään. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2014, s.443)

3.1.2 Pyöräkohtainen moottori

Jokaiselle vetävälle pyörälle on mahdollista käyttää omaa sähkömoottoria. Tällöin vältetään tasauspyörästä käyttötärpeeltä. Sähkömoottori sijoitetaan tässä tapauksessa vetävän pyörän läheisyyteen, josta voima välitetään akselilla vetävälle pyörälle. Jotta vältettäisiin liian suuri vääntömomentti moottorilla, käytetään alennusvaihdetta. Toinen vaihtoehto on käyttää napamoottoria, joka voidaan sijoittaa joko vetävän pyörän ulkopuolelle tai vanteen sisäpuolelle. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2014, s.443)

3.2 Hybridiajoneuvo

Hybridiajoneuvo on ajoneuvo, joka käyttää vähintään kahta eri voimanlähdettä liikkeen aikaansaamiseen. Yleisimmin käytetyt hybridiratkaisut koostuvat polttomoottorista ja yhdestä tai useammasta sähkömoottorista. Tässä työssä keskitytäänkin sähkömoottorilla varustettuihin ratkaisuihin. Muita vaihtoehtoja ovat esimerkiksi hydraulinen tai pneumaattinen hybridiajoneuvo. Yhteistä kaikille eri hybridityypeille on hidastusenergian varastoiminen ja sen käyttäminen työntövoimana. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 19:21)

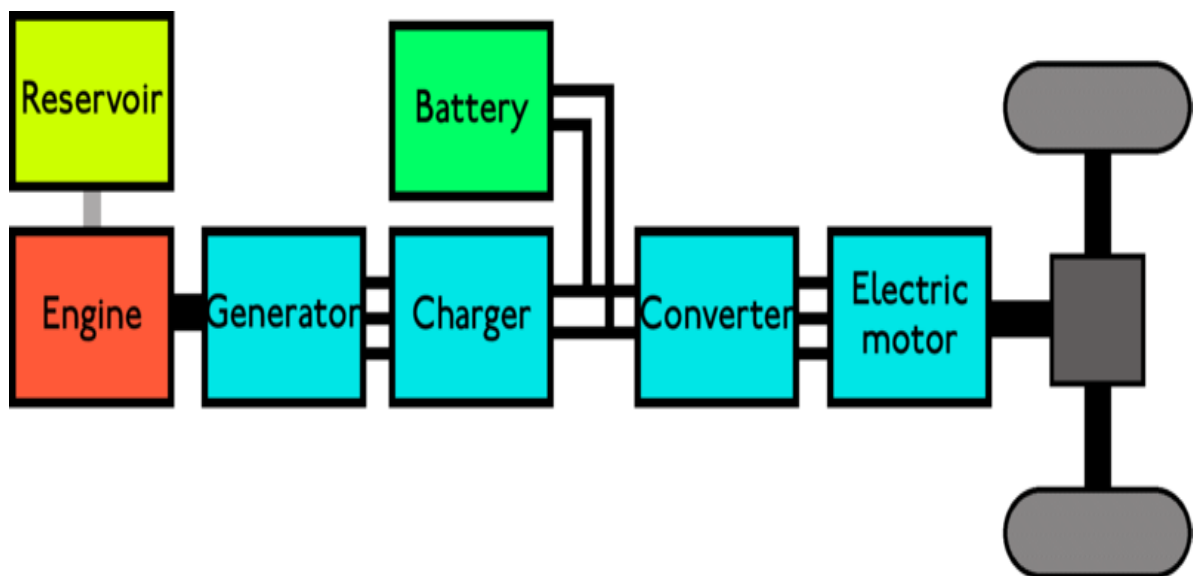
HEV (hybrid electric vehicle) on sähkömoottorilla varustettu hybridiajoneuvo, joka kerää jarrutettaessa syntyvää energiaa akkuihin ja käyttää sitä ajoneuvon liikuttamiseen polttomoottorin rinnalla. Tällä periaatteella saavutetaan parempi polttoainetaloudellisuus ja suurempi teho kuin yksistään polttomoottoria käyttämällä. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 19)

PHEV (plug in hybrid electric vehicle) on muutoin kuten HEV, mutta varustettu ulkopuolisella akuston lataus mahdollisuudella. Siinä on useimmiten myös suurempi

akkukapasiteetti ja sitä voidaan käyttää matalilla nopeuksilla ja pienillä toimintasäteillä kuten täyssähköajoneuvoa. Raskaan kaluston käytössä läheskään kaikki toiminta ei tapahdu ajoneuvon liikkua. Tällöin varsinkin PHEV pääsee oikeuksiinsa mahdollistaen lisälaitteiden käytön myös polttomoottorin ollessa sammutettuna. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 25)

3.2.1 Sarjahybridi

Kuvassa 3 on esitetty sarjahybridin rakennekuva. Sarjahybridissä polttomoottorilta ei kulje mekaanista voimansiirtolinjaa vetäville pyörille, vaan polttomoottorin jatkeena on generaattori, joka ajotilanteen mukaan lataa akkua tai välittää sähkövirran suoraan sähkömoottorille. Sarjahybridin etuja ovat polttomoottorin operointi ihanteellisella kierroslukualueella ja voimansiirron yksinkertaisuus. Sähkömoottoria voidaan käyttää tehokkaasti monilla eri kierrosnopeuksilla molempiin pyörimissuuntiin, joten vaihteistoa ei välttämättä tarvita lainkaan. (Fischer, Küçükay et al. 2015, s. 285:286)



Kuva 3. Rakennekuva sarjahybridistä (Wikimedia 2006b)

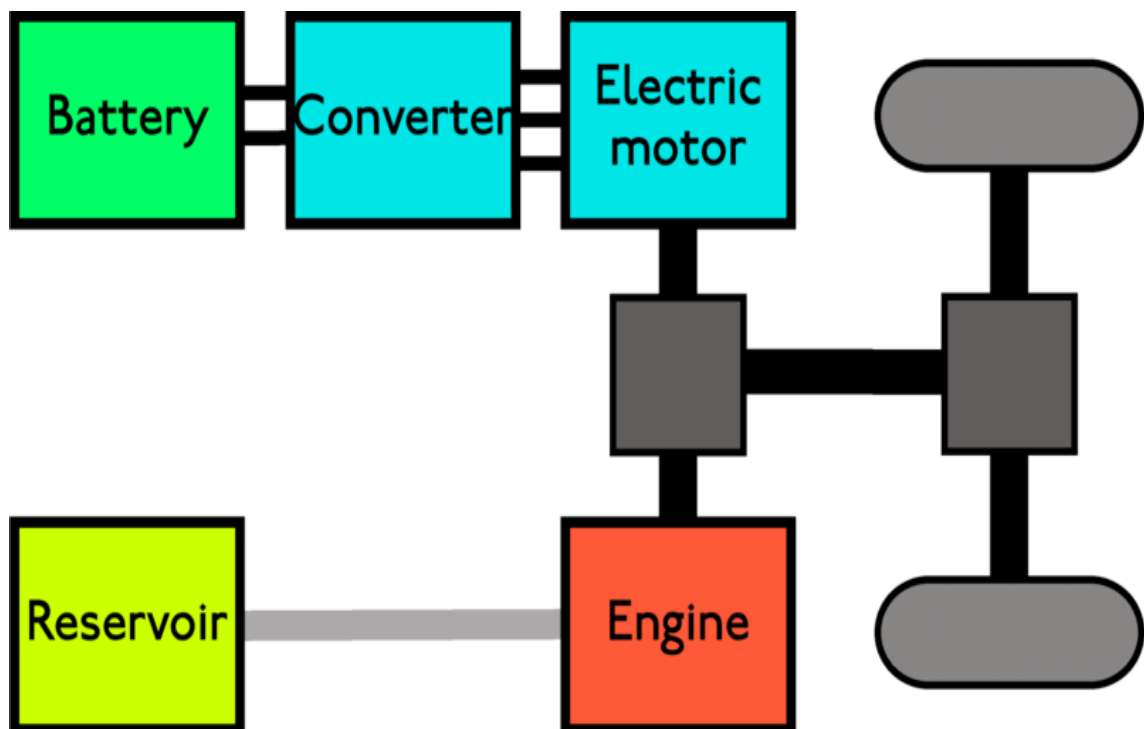
Sarjahybridi on käytännössä EV varustettuna polttomoottorilla ja generaattorilla. Tästä aiheutuu haittapuolia verrattuna muihin hybridiratkaisuihin. Sarjahybridin sähkömoottorit on mitoitettava mahdollistamaan ajoneuvon operointi kaikissa tilanteissa.

Muissa hybrideissä sähkömoottorit voidaan mitoittaa pienemmälle voiman tarpeelle, koska niitä käytetään avustamaan polttomoottoria ajoneuvon liikuttamiseen. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 159:160)

3.2.2 Rinnakkaishybridi

Rinnakkaishybridissä polttomoottoria ja sähkömoottoria voidaan käyttää toisistaan riippumatta, sillä molemmat moottorit ovat kytkettynä suoraan voimansiirtoon. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 154:155)

Rinnakkaishybridin voimansiirron rakenne on esitettyä kuvassa 4. Siinä sekä polttomoottori että sähkömoottori ovat kytkettyinä voimansiirtoon, ja niitä voidaan käyttää myös toisistaan riippumatta. Polttomoottori on suunniteltu mahdollisimman tehokkaaksi sähkömoottorin antaessa vääntömomentin. Sähkömoottoria voidaan käyttää avustamaan polttomoottoria tilanteissa, joissa vaaditaan suurta voimaa kuten kiihdytyksissä tai mäkien nousuissa. Sähkömoottoria voidaan käyttää myös ilman polttomoottoria, mikäli ajotilanne sen sallii esimerkiksi hitaissa nopeuksissa tai loivassa alamäessä. (Fischer, Küçükay et al. 2015, s. 287)



Kuva 4. Rakennekuva rinnakkaishybridistä (Wikimedia 2006a)

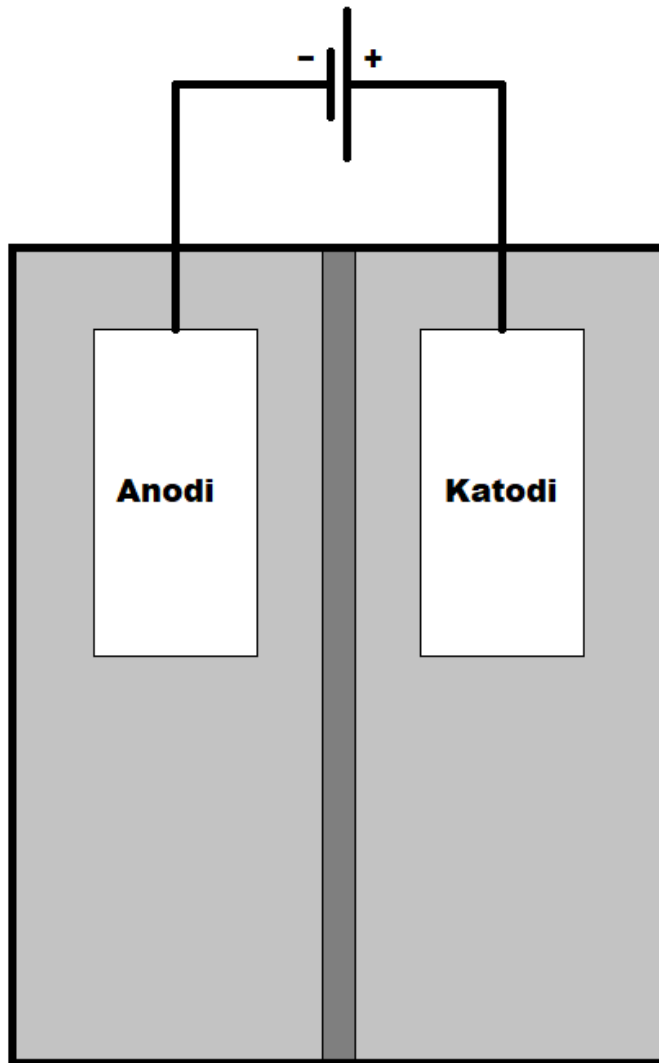
Liikkeelle lähdettäessä vaaditaan suurta vääntömomenttia ja rinnakkaishybridissä käytetään tällöin ainoastaan sähkömoottoria ja polttomoottori käynnistyy vasta nopeuden kasvaessa tarpeeksi. Sähkömoottoria ja polttomoottoria käytetään rinnakkain tilanteissa, joissa vaaditaan suurta voimaa kuten kiihdytyksissä tai mäkien nousuissa. Pelkkää polttomoottoria käytetään normaalissa ajotilanteessa. Generaattori lataa akkua alamäessä tai jarrutettaessa. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 158:159)

4 AKUT JA NIIDEN LATAAMINEN

Sähkökemiallisen pariston kehitti italialainen Alessandro Volta (1745–1827), jonka mukaan jännitteen yksikkö voltti (V) on nimetty. Sähköenergiaa varastoidaan kertakäyttöisiin paristoihin tai uudelleen ladattaviin akkuihin. Akut koostuvat useista sarjaan kytketyistä akkukennoista, joiden määrää säätelemällä saadaan haluttu akun jännite. Kytkemällä kennoja sarjaan saadaan kasvatettua akun käyttöjännitettä ja rinnan kytkennällä varauskapasiteettia. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 68:73)

Kulkuneuvoissa käytettävän akun tulisi olla luotettava, kevyt ja paljon energiaa varastoiva. Energian varastointikykyä suhteessa akun massaan kuvaa energiatiheys (Wh/kg). Aluksi sähköajoneuvoissa käytettiin lyijyakkuja, mutta nykyään nikkelimetallihybridi- ja litium-ioniakut ovat syrjäyttäneet niiden käytön. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 68:72)

Kuvassa 2 on esitetty yhden akkukennon rakennekuva. Akkukenno koostuu negatiivisesta elektrodista anodista ja positiivisesta elektrodista anodista sekä kuvassa 2 vaaleanharmaalla esitetystä elektrolyytistä. Elektrolyytti kuljettaa katodin ja anodin välillä ionivirtaa. Ionien kulkusuunta riippuu, latautuuko vai purkautuuko akku. Katodin ja anodin erottaa toisistaan kuvassa 2 tummanharmaalla väritetty erotin, joka mahdollistaa ionivirran kulkemisen lävitseen. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 112:113)



Kuva 2. Akkukennon rakenne

Taulukossa 2 on vertailtu eri akkutyyppien energiatheyden, ominaistehon ja kennojännitteen mukaan. Ominaistehossa ei ole eri akkutyyppien välillä suuria poikkeavuuksia, mutta energiatheydessä perinteinen lyijyakku (PbA) jää selvästi muiden tyyppien alapuolelle. Litiumioniakun (Li-ion) energiatheys on noin 50 % suurempi kuin nikkeli-metallihybridiaakun (NiMH). Vertailun vuoksi bensiinin energiatheys on 12500 Wh/kg ja dieselin 12000 Wh/kg (Husain 2011, s. 100). Kaikkien akkutyyppien energiatheys jää huomattavasti näistä arvoista. Tästä syystä akustosta tulee huomattavasti lisää painoa verrattuna polttomoottoriin tavoiteltaessa samaa toimintasädetä, vaikka sähkömoottorilla on polttomoottoria parempi hyötysuhde.

Taulukko 2. Akkutyyppien vertailu (mukaillen Hayes, Goodarzi 2018, s. 79)

Akkutyyppi	Kennojännite (V)	Energiatiheys (Wh/kg)	Ominaisteho (W/kg)
Lyijy (PbA)	2	35	250–500
Nikkeli-metallihybridi (NiMH)	1.2	30–100	200–600
Litiumioni (Li-ion)	3.8	80–160	250–600

Sähkö ja hybridiajoneuvokäytössä käytetään jopa 700 V jännitettä. Tyypillisesti jännite on henkilöautoissa noin 300V, mutta raskaassa kalustossa se on hieman korkeampi. Esimerkiksi Mercedes-Benz eActros kuorma-autossa käyttöjännite on 400 V Volvo 7900 linja-autossa 600 V (Vehotricks 2018, Volvo 2020). Suuri jännite tuo omat haasteensa. Polttomoottoriajoneuvoissa käytettävät 12 V ja 24 V jännitteet eivät ole vaarallisia sähköiskun sattuessa, mutta satojen volttien jännitteet ovat hengenvaarallisia. (Denton 2016, s. 15:16)

Korkean jännitteen turvalliseen siirtämiseen käytetään korkeajännitekaapeleita, jotka on suunniteltu kestämaan suuret jännitteet ja virrat. Kaapelissa kulkeva sähkövirta saadaan yhtälöstä 2:

$$I = \frac{P}{U}, \quad (2)$$

missä I on sähkövirta [A]

P on teho [W] ja

U on jännite [V].

Esimerkiksi Volvo 7900 sarjan pienimmässä bussissa 200 kW huipputeholla ja 600 V jännitteellä sähkövirraksi saadaan 333 A (Volvo 2020). Suuremmissa busseissa ja varsinkin ajoneuvoyhdistelmissä käytetään tehokkaampia moottoreita, jolloin myös sähkövirta kasvaa. (Denton 2016, s. 68)

4.1 Lyijyakku

Ranskalainen fyysikko Gaston Planté kehitti ladattavan lyijyakun (PbA) vuonna 1859. Ajoneuvoteollisuus on kautta historian käyttänyt runsaasti lyijyakkuja. Viime vuosikymmeninä niiden käyttö on kuitenkin hiipunut muiden akkutyyppeiden yleistyessä. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 115)

Lyijyakussa sekä anodina että katodina toimii lyijylevy (Pb) ja elektrolyytinä rikkihapon (H_2SO_4) ja veden (H_2O) seos. Varauksettomassa akussa lyijylevyt ovat lyijysulfaatin (PbSO_4) peitossa. Akun varautuessa katodilla tapahtuu hapettuminen, jonka seurauksena katodin pinta peittyy lyijyoksidilla (PbO_2). Anodi puhdistuu lyijysulfidista pelkistymisen seurauksena, jolloin anodiksi jää puhdas lyijylevy. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 74:75)

4.2 Nikkelimetallihybridi-akku

Nikkeli-metallihybridiakku eli NiMH-akku on hyvin samanlainen aiemmin runsaasti käytetyn nikkelikadmiumakun kanssa. Molemmilla näistä akkutyypeistä on muisti-ilmiö, jonka vuoksi niiden varauskyky heikkenee, mikäli niitä toistuvasti varataan ainoastaan osittain. (Hayes, Goodarzi 2018, s. 75:76)

Varauksettoman NiMH-akun katodi on nikkelihydroksidia ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) ja anodi metalliseosta (M). Elektrolyytinä toimii kaliumhydroxidi (KOH). Varattaessa akkua katodin nikkelihydroksidi hapettuu nikkelioksidihydroksidiksi (NiOOH) ja anodin metalliseos pelkistyy metallihybridiksi (MH). (Hu, Smaling et al. 2012, s. 117:118)

4.3 Litium-ioniakku

Litium-ioniakun eli Li-ion-akun kehitystyö aloitettiin 1980-luvun alussa ja ensimmäiset Li-ion-akut tulivat markkinoille 1991. Alkuun Li-ion-akkuja käytettiin lähinnä pienissä kannettavissa langattomissa laitteissa, mutta akkutyyppi alkoi melko nopeasti ottaa valtaa myös suuremmissa käyttökohteissa, kuten sähköautojen akuissa. Li-ion -akuissa käytetään yleensä katodina litiumkobolttioksidia (LiCoO_2) ja anodi hiilivalmistetta, kuten grafiittia (C_6). Käytetyin elektrolyyttiliuos on litium-heksafluorifosfaattia (LiPF_6). Varattaessa akkua katodin litiumkobolttioksidi pelkistyy kobolttioksidiksi (CoO_2) ja anodi hapettuu litiumgrafiitiksi (LiC_6) (Hayes, Goodarzi 2018, s. 75:76). (Pistoia, Pistoia 2014, s. 2,3,13)

Li-ion-akulla ei ole muisti-ilmiötä, mutta sen varauskyky laskee käyttöiän ja varaus-purkaus-sykliden myötä (Hayes, Goodarzi 2018, s.76).

4.4 Superkondensaattori

Akkujen lisäksi energiaa voidaan varastoida superkondensaattoreihin. Aivan kuten akku, myös superkondensaattori koostuu kahdesta elektrodista, elektrolyytistä ja erottimesta. Elektrolyytissä olevat ionit vain eivät reagoi kemiallisesti elektrodien kanssa. Sähkö- ja hybridiajoneuvoissa käytetään kaksikerroksisia superkondensaattoreita, joiden toiminta perustuu sähköstaattisiin reaktioihin. Toimintatavan takia, superkondensaattorin varauskyky ei laske varaus-purkaus-sykliden myötä toisin kuin sähkökemiallisiin reaktioihin perustuvien akkujen. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 123:124)

Superkondensaattorin etuna ajoneuvokäytössä on sen akkuihin verrattuna suuret varaus- ja purkausnopeudet. Haittapuolena puolestaan on akkuja pienempi energiatiheys ja suurempi jännitteen laskeminen varauksen laskiessa. (Hu, Smaling et al. 2012, s. 123:124)

4.5 Erilaisia lataustapoja

Luvussa 3 käsiteltiin sähkö- ja hybridiajoneuvoja, missä yhteydessä sivuttiin akuston lataamismahdollisuuksia. Kaikki sähkö- ja hybridiajoneuvot on varustettu generaattorilla,

jolla hidastettaessa syntyvää energiaa saadaan kerättyä talteen. Generaattori lataa akkua myös sarjahybridissä, jossa generaattorin pyörittäminen hoidetaan polttomoottorilla.

Ulkoiseen lataukseen voidaan käyttää pistokelatausta. Pistokelataaminen voidaan hoitaa joko hitaammalla AC-latauksella tai standardisoidulla DC-pikalatauksella. Pikalatausstandardeja on useita erilaisia, joista raskaassa kalustossa käytetään yleisesti eurooppalaisten autovalmistajien kehittämää CCS-pikalatausta. Volvon sähköbussissa CCS-pikalatauksella mahdollistetaan 150 kW:n latausteho. Volvo käyttää lisäksi omaa OppCharge latausjärjestelmäänsä, jolla mahdollistetaan jopa 450 kW:n latausteho. (Volvo 2020)

Raitiovaunu ja junaliikenteessä jo pitkään käytössä ollut radan sähköistämistä on kokeiltu myös maanteillä. Ruotsissa avattiin vuonna 2016 maailman ensimmäinen sähköistetty moottoritie E16. Suurimmat yksityisen sektorin yritykset hankkeessa olivat lataustekniikan kehittänyt saksalainen Siemens ja ruotsalainen ajoneuvovalmistaja Scania. Kahden kilometrin mittaisella tieosuudella kulkee johtimet tien yläpuolella, tiellä kulkevien ajoneuvojen lataamiseksi. Lataamisen mahdollistamiseksi ajoneuvo tulee varustaa pantografeilla. Ensimmäinen kyseisellä tiellä liikennöinyt ajoneuvo oli Scania G360 4 x 2 puoliperävaunuyhdistelmä, joka oli varustettu Siemensin kehittämällä pantografeilla. (Scania 2016)

Henkilöautovalmistaja Hyundai on esitellyt aurinkopaneelein varustellun hybridauton vuonna 2019. Ajoneuvon katolle on integroitu aurinkopaneelit, jotka lataavat akkuja. Aurinkopaneeleilla on mahdollista ladata optimaalisissa olosuhteissa noin 30–60 prosenttia akuston kapasiteetista vuorokaudessa. (Hyundai 2019)

5 SÄHKÖMOOTTORIN KÄYTTÖ ERI KOHTEISSA

Useissa eri raskaan kaluston käyttökohteissa käytetään sähkömoottoria voimanlähteenä. Sitä voidaan käyttää joko ainoana voimanlähteenä tai osana hybridijärjestelmää. Sähkömoottorin käytöllä saavutetaan monia hyötyjä polttomoottorin verrattuna, mutta sen käyttöön liittyy myös joitain ongelmia eri käyttökohteissa. Seuraavaksi käydään läpi sähkömoottorin käyttöä, hyötyjä ja haittoja eri käyttökohteissa.

5.1 Henkilö- ja tavaraliikenne

Eri valmistajat ovat lanseeranneet omia sähkö- ja hybridiajoneuvoja varsinkin kaupunkien jakelu- ja henkilöliikenteeseen. Pitkien välimatkojen maantiekuljetuksiin rajoituksia luovat käytösäde, joka esimerkiksi sekä Mercedes-Benzin eActrosilla että MAN eTruckilla on 200 km. Sähkökäyttöiset kuorma-autot ovat suunniteltu siten, että akuston lataaminen tapahtuu verkkovirrasta yön aikana. Tämä asettaa haasteita toimialoille, joissa ajoneuvoa käytetään lähes ympäri vuorokauden. Esimerkiksi maitoautot liikkuvat noin 22–23 tuntia vuorokaudessa, jolloin sähköauton lataaminen muodostuisi haasteelliseksi (Järvinen 2019). (MAN 2020, Vehotricks 2018)

Ruotsalaisen hyötyajoneuvovalmistaja Volvon kaupunkiliikenteeseen tarkoitettu Volvo 7900 -linja-automallisto käsittää HEV, PHEV ja EV versiot. PHEV ja EV versiot on mahdollista varustaa Volvon OPPCharge latausjärjestelmällä, jolla mahdollistetaan tehokas lataaminen esimerkiksi ajoneuvon päätepysäkillä. (Volvo 2020)

Vuonna 2017 esitellyn täyssähköisen Volvo 7900 Electric -linja-auton tarkoituksena on vähentää kaupunkien joukkoliikenteen päästöjä sekä tehdä joukkoliikenteestä matkustajille miellyttävä kokemus (Volvo 2017). Sähkökäytön ansiosta linja-auto on diesel käyttöisiä hiljaisempi, mikä parantaa matkustusmukavuutta ja alentaa käyttöympäristön melusaasteita. Volvon akkujen lataustekniikka mahdollistaa akkujen lataamisen joustavan käytön, jolloin lataaminen on vaivatonta. Sähkölinja-autoa voidaan ladata joko varikolla tai tarvittaessa myös reitin varrella. (Volvo 2020)

5.2 Kaivosteollisuus

Kaivosajoneuvojen valmistaja Normet on kehittänyt sähkökäyttöisten kaivosajoneuvojen SmartDrive tuoteperheen. SmartDrive ajoneuvoilla vältetään kaivoksissa dieselistä syntyvät päästöt, millä on suuri vaikutus tunneleiden ilmanlaatuun. Laskeuduttaessa syvemmälle kaivokseen saadaan akkuja ladattua tehokkaasti, jolloin muutoin hukkaan menevä jarrutusenergia kerätään talteen. (Normet 2020)

5.3 Maa- ja metsätalous

Saksalainen traktorivalmistaja Fendt on kehittänyt täyssähköisen e100 Vario -traktorin, joka on varustettu samoin monipuolisin varustein kuin perinteiset dieselkäyttöiset traktorit. Fendt e100 Vario on mahdollista varustella maatalouskäytön lisäksi myös kaupunkien ja kuntien tarpeisiin. (Fendt 2020)

Suomalaisen metsäkonevalmistaja Logsetin tuoteperheeseen kuuluu kaksi hybridiharvesteria, 8H GTE Hybrid ja 12H GTE Hybrid. joista malliston lippulaiva on 12H GTE Hybrid, jossa sähkömoottori toimii dieselmoottorin rinnalla mahdollistaen pienemmän polttoaineen kulutuksen ja matalammat päästöt. Sähkömoottorin tehtävänä on tasata huippukuormitusten tehontarvetta, jolloin dieselmoottori toimii matalalla ja tasaisella kierrosnopeudella. Logset ei käytä hybridiratkaisuissaan akkuja, vaan superkondensaattoreita. (Logset 2020)

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia sähkömoottoreiden käyttöä raskaan kaluston voimanlähteenä. Sähkömoottorin käytöllä voidaan alentaa ajoneuvon käyttökustannuksia dieselmoottoriin verrattuna. Käyttökustannusten lisäksi ajonaikaiset päästöt pienenevät, kun fossiilisten polttoaineiden käyttö vähenee.

Sähkömoottoria voimanlähteenä hyödyntäviä ratkaisuja ovat täyssähköajoneuvot ja sähköhybridit. Hybridiajoneuvo voi olla varustettu ulkoisella latausmahdollisuudella, jolloin sitä voidaan käyttää kuten täyssähköajoneuvoa. Hybriditeknikalla saavutetaan pelkästään polttomoottoriin verrattuna merkittävä etu, kun jarrutusenergia saadaan kerättyä talteen myöhempää käyttöä varten.

Ajoneuvokäyttöön soveltuvia sähkömoottoreita on useita eri tyyppisiä. Käyttökohteeseen soveltuvan moottorin valintaan vaikuttavat vaaditut ominaisuudet, kuten saatavissa oleva teho, rakenteen yksinkertaisuus ja huoltovarmuus. Perinteistä hiiliharjallista DC-moottoria ei juurikaan käytetä, vaan sen sijaan käytettäväksi valitaan useimmiten AC-moottori tai hiiliharjaton elektronisesti ohjattu DC-moottori.

Sähkömoottoreita käytettäessä täytyy sähköenergia saada varastoitua tehokkaasti. Energian varastointiin on käytettävissä erilaisia akkutyppejä kuten Li-ion-, NiMH- tai Pb-akku. Näiden lisäksi jotkin valmistajat käyttävät superkondensaattoreita.

LÄHDELUETTELO

DENTON, T., 2016. *Electric and hybrid vehicles*. Abingdon, Oxon: Routledge.

FENDT, 2020-last update, Fendt e100 Vario. Available: <https://www.fendt.com/int/e100-vario> [April 27, 2020].

FISCHER, R., KÜÇÜKAY, F., JÜRGENS, G., NAJORK, R. and POLLAK, B., 2015. *The automotive transmission book*. Cham: Springer.

HAYES, J.G. and GOODARZI, G.A., 2018. *Electric powertrain : energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles*. Hoboken, N.J.: Wiley.

HU, H., SMALING, R. and BASELEY, S.J., 2012. *Advanced hybrid powertrains for commercial vehicles*. Warrendale, PA: SAE International.

HUSAIN, I., 2011. *Electric and hybrid vehicles : design fundamentals*. Second Edition edn. Boca Raton: CRC Press.

HYUNDAI, August 2, 2019-last update, Hyundai launches first car with solar roof charging system. Available: <https://www.hyundai.news/eu/brand/hyundai-launches-first-car-with-solar-roof-charging-system/> [April 27, 2020].

JÄRVINEN, S., 2019-last update, Maitoauton matkassa. Available: <https://www.scania.com/fi/fi/home/experience-scania/features/2019/kuljetusliike-hartikainen.html> [April 23, 2020].

LINDELL, I., 1994. *Sähkötekniikan historia*. Espoo: Otatieto.

LOGSET, 2020-last update, Logset 12H GTE Hybrid. Available: <https://www.logset.com/fi/harvesterit/logset-12h-gte-hybrid> [April 27, 2020].

MAN, 2020-last update, MAN eTruck Concept vehicle. Available: <https://www.truck.man.eu/de/en/man-etruck.html> [April 23, 2020].

MOTIVA, 2019-last update, Sähkömoottorityypit. Available: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/alitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit [May 26, 2020].

NORMET, 2020-last update, SmartDrive. Available: <https://www.normet.com/smartdrive/> [April 23, 2020].

PISTOIA and PISTOIA, G., 2014. *Lithium-Ion Batteries : Advances and Applications*. Elsevier.

SCANIA, June 23, 2016-last update, World's first electric road opens in Sweden. Available: <https://www.scania.com/group/en/worlds-first-electric-road-opens-in-sweden-2/> [April 8, 2020].

SCHAEFFLER TECHNOLOGIES AG & CO. KG, 2014. *Solving the powertrain puzzle : 10th Schaeffler Symposium April 3/4, 2014*. 1st edition edn. Weisbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

TEKNOLOGIATEOLLISUUS, 2019. *Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q3/2019*. Helsinki: Teknologiateollisuus.

VEHOTRUCKS, 2018-last update, eActros-sähkökuorma-autojen asiakastestit alkavat Euroopassa. Available: <https://www.vehotrucks.fi/uutishuone/2018/eactros-sahkokuorma-autojen-asiakastestit-alkavat-euroopassa/> [April 23, 2020].

VOLVO, 2020-last update, Volvo 7900 Electric. Available: <https://www.volvobuses.fi/fi-fi/our-offering/buses.html> [April 24, 2020].

VOLVO, 2017-last update, New Volvo 7900 Electric offers greater range and flexibility. Available: <https://www.volvogroup.com/en-en/news/2017/oct/new-volvo-7900-electric-offers-greater-range.html> [April 27, 2020].

WICKS, F., 1999. *The blacksmith's motor*. American Society of Mechanical Engineers.

WIKIMEDIA, 2006a-last update, Hybridpar. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hybridpar.png> [August 28, 2020].

WIKIMEDIA, 2006b-last update, Hybridserie. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hybridserie.png> [August 28, 2020].

WIKIPEDIA, 2006-last update, Electric motor cycle. Available: https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Electric_motor_cycle_2.png [May 26, 2020].